

普通高等教育规划教材

在 [http://www.china-pub.com](#) 搜索古籍书城 获取更多电子书

材料力学

刘庆潭 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育规划教材

材 料 力 学

主 编 刘庆潭
参 编 刘 静 李东平
喻爱南 王修琼
主 审 龙述尧



机械工业出版社

本教材是根据目前本科材料力学课程学时为 60~90 的教学大纲而编写的。考虑到不同专业和不同层次的需要,教材采用组合式结构,内容的组织分为必要的基础部分和较深层次的提高部分,使用者可根据需要进行内容的组合。

根据当前的教学要求,本教材对传统教材的教学内容进行了认真的取舍,补充了一些现在学生必须掌握的内容,同时引入了反映现代科技成果的一些新内容。为提高学生的素质,加强学生能力的培养,本教材将材料力学的基本理论、基本概念和现代的一些计算方法有机结合。除系统地介绍一些计算机的解题方法外,在不少章的习题里还穿插了利用计算机解题的作业。引导学生在学习材料力学的时候充分利用计算机来解决一些工程问题,这也是本教材的主要宗旨和主要特色。

本教材主要面向土建类专业的本科学生,兼顾机械、化工、冶金类的专业,也可供高等学校工程专科和成人教育学院的有关专业的学生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

材料力学/刘庆潭主编. —北京:机械工业出版社, 2003. 1

普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-11416-7

I. 材... II. 刘... III. 材料力学—高等学校—教材 IV. TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 102777 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:季顺利 版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 2 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·16.75 印张·652 千字

0 001—5 000 册

定价:38.00 元 (含 1CD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面防伪标均为盗版

docsriver 文川网
入驻商家 古籍书城

在文川网搜索古籍书城 获取更多电子书

序

材料力学是理工科一门极其重要的技术基础课，随着现代化建设的蓬勃发展，其重要性日益彰显。对理工科学生而言，本课程的学习情况对后续课程及今后的工程实践都具有重要的影响。正因如此，这些年来不少教师都致力于本课程的改革与研究，全国涌现了一批各具特色的材料力学新教材。

本书汲取了国内优秀教材的长处，并在此基础上增加了传递矩阵法的新内容，这正是本书另辟蹊径之处。在本书中，编者将材料力学的基本概念、基本理论和现代的计算方法相结合，使学生能用学到的知识通过计算机来解决一些工程实际问题。在计算机的应用已渗入各个领域的今天，此举无疑是意义深远的。这也是本书有别于国内其他材料力学教材的一大鲜明特色。

本书的作者是一些勤于耕耘的园丁。主编刘庆潭教授执鞭二十余载，主持和参加了多项国家及省部级课题的研究，发表了多篇科研论文并出版了专著。本书传递矩阵法中的一些内容便是其部分科研成果的反映。参编的四位副教授均是博士，亦从教多年，教学经验颇为丰富。

近十年来，他们参加了教育部面向 21 世纪“力学系列课程教学内容和体系改革的研究与实践”项目的研究，主持了项目中《材料力学演示型多媒体课件》及“九五”国家重点科技攻关项目《工程力学训练型多媒体课件》的研制，参加了“九五”国家重点教材《材料力学训练型课件》的编写，先后获湖南省优秀教学成果一、二等奖和铁道部优秀教材二等奖。所研制的课件均由高等教育出版社出版，在全国众多高等院校中得到应用，具有广泛的影响。特别值得一提的是，在这些课件的研制过程中，均有学生参加。同学们通过这些活动，提高了自己的动手能力，加强了自身素质的培养。本书所配的材料力学计算机软件光盘，也是由老师带领同学历时一年研制而成的。这说明，只要引导得法，大学生在校期间就可以早出成果，出好成果！

总之，本书凝聚了刘庆潭等五位教师二十余年的教学经验和教改研究成果，是一本不可多得的优秀教材。相信本教材的出版必将给材料

IV

力学界的花苑增添一朵新的奇葩!

本书出版之际,正值“春风又绿江南岸”之时。春华秋实,愿我们的园丁为祖国的未来更辛勤地耕耘!

以此为序。

中南大学土木工程与建筑学院院长
中国工程院院士、波兰科学院外籍院士

刘宝琛

2003年1月19日

前 言

本教材的基本教学内容是根据 2002 年教育部高等学校理工科非力学专业力学基础课程教学指导分委员会在西安会议通过的“材料力学课程教学基本要求(草案)”而编写的,可满足目前本科材料力学课程 60~90 教学学时的需要。考虑到不同专业和不同层次的教学要求,教材采用组合式结构,内容的组织分为必要的基础部分和较深层次的提高部分,使用者可根据需要进行内容的组合。

根据当前的教学要求,本教材对传统教材的教学内容进行了认真的取舍,补充了一些目前学生应当掌握的内容,同时引入了反映现代科技成果的一些新内容。为提高学生的素质,加强学生能力的培养,本教材将材料力学的基本理论、基本概念和现代的一些计算方法有机结合。除系统地介绍一些计算机的解题方法外,在一些章节的习题里还穿插了利用计算机解题的作业。为了方便学生进行学习,本书配有用于材料力学计算和绘图软件光盘。这一方面可以作为一种计算机辅助教学的工具,加深对所学知识的理解;另一方面又可作为一种计算工具,使学生能将学到的材料力学知识应用到工程实际中去。引导学生在材料力学学习的时候充分利用计算机来解决一些工程问题,是本教材的主要宗旨和主要特色。实际上,近十年来我们一直坚持在材料力学课程的教学大力开展大学生的课外科技活动,让他们应用计算机来完成材料力学中一些繁杂的计算。通过这些活动,有些同学编制了一些应用程序解决了工程中的实际问题,有些学生还撰写了一些有一定见地的论文。通过这些活动,提高了学生的动手能力,加强了学生综合素质的培养。

本教材主要面向土建类专业的本科学生,兼顾机械、化工、冶金类的专业,也可供高等学校工程专科和成人教育学院的有关专业学生参考。本教材由中南大学刘庆潭主编,湖南大学龙述尧教授担任主审。教材的编写分工为:刘庆潭编写第一、第十七和第十八章,刘静编写第六~九章,李东平编写第十、第十五、第十六章和附录 A,喻爱南编写第二~五章,王修琼编写第十一~十四章。书后所配光盘的材料力学计算软件由刘庆潭、胡所亭、薛芳、唐智伟、周在东、祝志恒编写和研制。

限于编者水平,加之时间紧迫,书中难免有不少缺点和不妥之处,深望广大师生和读者批评指正。

本书在编写和出版过程中,得到了中南大学土木建筑学院领导的重视和关心,土木建筑学院院长、中国工程院兼波兰科学院院士刘宝琛先生欣然为本书提笔作序。在本书付样之际,向他们表示衷心的感谢。

编者

主要符号表

符号	含义	符号	含义
A	面积	p	内压力
b	宽度	P	功率
d	直径、距离	q	均布载荷集度
D	直径	R, r	半径
e	偏心距	S_y, S_z	静矩
E	弹性模量	S	广义应力
F_P, F	集中力	u	水平位移
F_{Ax}, F_{Ay}	A 处约束力	v	挠度垂直位移, 应变能密度
F_N	轴力	v_d	畸变能密度
F_Q	剪力	v_v	体积改变能密度
F_{Pcr}	临界载荷	V_e	应变能
F_s	屈服载荷	W	功, 重力, 弯曲截面系数
F_u	极限载荷	W_P	扭转截面系数
G	切变模量	α	倾角, 线膨胀系数
h	高度	β	角, 表面加工质量因数
I, I_y, I_z	惯性矩	θ	角, 梁横截面的转角, 单位长度相对扭转角
I_P	极惯性矩	φ	相对扭转角, 折减因数
i, i_y, i_z	惯性半径	γ	切应变
I_{yz}	惯性积	$\Delta, \Delta l$	变形, 位移
k	弹簧刚度系数	δ	厚度, 加工误差, 虚变形
l	长度、跨度	ε	线应变, 尺寸因数
M, M_y, M_z	弯矩	ε_e	弹性应变
M_e	外加扭转力偶矩	ε_p	塑性应变
M_T	扭矩	ε_v	体积应变
m	质量	λ	柔度
M	力偶矩	μ	长度系数
M_s	屈服弯矩	ν	泊松比
M_u	极限弯矩	ρ	密度, 曲率半径
M_{Ts}	屈服扭矩	σ	正应力
M_{Tu}	极限扭矩	σ_t	拉应力
n	转速、工作安全因数、模数比	σ_c	压应力
n_{st}	稳定安全因数		

符号	含义	符号	含义
σ_m	平均应力	$\sigma_{0.2}$	名义屈服点, 条件屈服应力
σ_b	抗拉强度	σ_r	相当应力
σ_{bs}	挤压应力	$\tilde{\sigma}$	残留正应力
$[\sigma]$	许用应力	$\tilde{\tau}$	残留切应力
$[\sigma_t]$	许用拉应力	τ	切应力
$[\sigma_c]$	许用压应力	$[\tau]$	许用切应力
σ_e	弹性极限	σ_{-1}	对称循环时的疲劳极限
σ_{cr}	临界应力	K_t	有效应力集中因数
σ_p	比例极限	K_f	理论应力集中因数
σ_s	屈服点		

目 录

序

前言

主要符号表

第一章 绪论	1
第一节 材料力学的任务	1
第二节 材料力学的发展简史	2
第三节 可变形固体的性质及基本假设	4
第四节 材料力学的主要研究对象及杆件变形的基本形式	5
第二章 拉伸、压缩与剪切	8
第一节 概述	8
第二节 轴向拉伸或压缩时的内力	8
第三节 轴向拉伸或压缩时的应力	11
第四节 材料在拉伸和压缩时的力学性能	15
第五节 轴向拉伸和压缩时的强度计算	21
第六节 轴向拉伸或压缩时的变形	24
第七节 简单拉压静不定问题	28
第八节 结构优化设计的概念	33
第九节 局部应力的概念及圣维南原理	36
第十节 剪切和挤压的实用计算	37
习题	42
第三章 扭转	52
第一节 概述	52
第二节 扭矩和扭矩图	53
第三节 纯剪切	55
第四节 圆轴扭转时的应力	57

第五节 圆轴扭转时的变形	62
第六节 非圆截面杆的扭转	64
习题	66

第四章 弯曲内力	72
第一节 概述	72
第二节 剪力和弯矩	74
第三节 剪力、弯矩与载荷集度间的关系	85
习题	88

第五章 弯曲应力	97
第一节 概述	97
第二节 弯曲时的正应力	97
第三节 弯曲时的切应力	102
第四节 梁的抗弯强度条件	108
第五节 提高抗弯强度的措施	113
习题	118

第六章 弯曲变形	126
第一节 概述	126
第二节 梁的挠曲线微分方程	127
第三节 用积分法求弯曲变形	128
第四节 用叠加法求弯曲变形	133
第五节 简单静不定梁	135
第六节 提高梁抗弯刚度的措施	137
习题	140

第七章 应力和应变状态分析	147
第一节 概述	147
第二节 二向应力状态分析——解析法	150
第三节 二向应力状态分析——图解法	154
第四节 三向应力状态分析	159
第五节 梁的主应力和主应力迹	

线	160	第二节 静不定结构的求解	287
第六节 位移与应变分量	163	第三节 对称与反对称性质的利 用	301
第七节 平面应变状态分析	164	习题	306
第八节 广义胡克定律	169	第十三章 动载荷	313
第九节 弹性固体的应变能	172	第一节 概述	313
习题	181	第二节 动静法的应用	313
第八章 强度理论	188	第三节 杆件受冲击时的应力和变形 计算	320
第一节 概述	188	第四节 冲击韧度	328
第二节 四种常用强度理论	189	习题	330
第三节 莫尔强度理论	197	第十四章 交变应力	336
习题	200	第一节 概述	336
第九章 组合变形	203	第二节 疲劳失效与持久极限	338
第一节 概述	203	第三节 影响持久极限的因素	341
第二节 两个平面弯曲的组合——斜 弯曲	204	第四节 构件的疲劳强度计算	346
第三节 拉伸或压缩与弯曲的组 合	208	第五节 变幅循环应力与累积损伤 理论	355
第四节 偏心压缩和截面核心	212	习题	360
第五节 扭转与弯曲的组合	217	第十五章 弯曲和扭转问题的进 一步讨论	364
习题	221	第一节 非对称弯曲	364
第十章 压杆稳定	227	第二节 开口薄壁梁的弯曲切应力与 弯曲中心	369
第一节 概述	227	第三节 复合梁	373
第二节 细长压杆的临界载荷	228	第四节 薄壁杆件的自由扭转	379
第三节 临界应力与临界应力 总图	235	习题	383
第四节 压杆的稳定计算	238	第十六章 杆件的塑性分析和残留 应力	388
第五节 提高压杆稳定性的措施	243	第一节 概述	388
习题	245	第二节 材料的塑性性质	388
第十一章 能量法	250	第三节 拉、压杆系的塑性分析和 残留应力	389
第一节 概述	250	第四节 圆轴的塑性扭转和残留 应力	393
第二节 互等定理	250	第五节 梁的塑性分析和残留应 力	395
第三节 余能定理与卡氏第二定 理	256	习题	402
第四节 虚功原理	265		
第五节 单位载荷法与莫尔积分	268		
习题	276		
第十二章 静不定结构	284		
第一节 概述	284		

第十七章 传递矩阵法	405	计算机作业	467
第一节 概述	405	附录	469
第二节 梁的内力和变形计算	405	附录 A 截面的几何性质	469
第三节 圆轴扭转时的内力和变形 计算	417	第一节 截面的静矩和形心	469
第四节 平面刚架结构的内力和 变形计算	421	第二节 截面的极惯性矩、惯性矩 和惯性积	471
第五节 轴向受压杆的稳定计算	430	第三节 平行移轴公式 组合截面 的惯性矩和惯性积	474
计算机作业	436	第四节 转轴公式 截面的主惯性 轴和主惯性矩	477
第十八章 矩阵位移法	439	习题	481
第一节 概述	439	附录 B 梁的挠度与转角公式	486
第二节 平面桁架结构的矩阵位 移法	441	附录 C 型钢规格表	489
第三节 梁的矩阵位移法	453	附录 D 习题答案	503
第四节 平面刚架的矩阵位移法	460	参考文献	524

第一章 绪 论

第一节 材料力学的任务

建筑物和机械通常都受各种外力作用，例如拦水坝受到的侧向水压力，隧道受到的山体围岩压力，起重机的钢缆绳受到的起吊物的重力，打桩机的重锤打在桩上的冲击力等等，这些力都是**载荷**。建筑物在承载中起骨架作用的部分，称为**结构**。组成结构或机械的单个部分，则称为**构件**，如建筑物的梁和柱，机床的轴等。

为了保证整个结构或机械正常地工作，构件应当有足够的**能力**负担起应当承受的**载荷**。因此，它应当满足以下要求：

1. 强度要求

在规定的载荷作用下，构件不能发生破坏。例如，房屋建筑物的横梁不能折断，隧道不能坍塌，压力容器不能爆裂。强度要求就是指构件应有足够的抵抗破坏的能力。

2. 刚度要求

在载荷作用下，构件除了必须满足强度要求外，还要求不能有过大的变形。例如，铁路桥梁在列车通过时若变形过大，则必将影响列车的正常行驶，危及行车安全；机床主轴变形过大，将影响加工精度。刚度要求就是指构件应有足够的抵抗变形的能力。

3. 稳定性要求

有些细长的受压构件，如房屋中的柱、铁路桁架桥的受压弦杆、千斤顶的螺杆等，应始终维持原有的直线平衡形态，保证不能压弯。稳定性要求就是指构件应有足够的保持原有平衡状态的能力。

设计构件时，不但要满足上述强度、刚度和稳定性的要求，还必须尽可能地合理使用材料和降低材料的消耗量。材料力学的任务就是在满足强度、刚度和稳定性要求的前提下，为设计既经济又安全的构件提供必要的理论基础和计算方法。

构件的强度、刚度和稳定性问题均与材料的力学性能（主要指材料在外力作用下表现出的抵抗变形和破坏等方面的性能）有关，这些力学性能均需通过材料力学实验来测定。此外，经过简化得出的理论是否可信，也要靠实验来验证。尚无理论结果的问题，还要借助实验方法来解决。所以实验分析和理论研究都是完成材料力学任务所必需的手段。

第二节 材料力学的发展简史

材料力学和其他学科一样，是人们在长期的生产实践中逐步地发展和丰富起来的，是人类的智慧与生产实践的结晶。

人类在征服自然的斗争中，接触并使用各种材料，最初是使用天然的材料，如石、竹、木等，后来是人工制造的材料，如砖、铜、铁、钢、水泥、塑料等。通过长期的生产活动，人们逐渐地认识了材料的性能，并掌握了对它们的使用规律。

我国是世界上文明发达最早的国家之一。我们勤劳智慧的祖先，在很早的年代里，就能根据构件的受力特点而采用合理的结构，以充分发挥材料的特性。

对砖石结构而言，我国劳动人民在很早以前就知道如何发挥这种材料的抗压能力。例如，闻名世界的万里长城，就是两千多年前用砖石砌成的伟大建筑。至今仍保持完整的河北赵州桥，是由隋代杰出的工匠李春于公元 600 年前后设计建造的。桥长 50.82m，桥面宽 9m，主拱半径为 25m。根据石料耐压不耐拉的特性，桥用石块砌成拱形，并合理地采取了拱上背拱的空腹式拱桥结构，使得净重减轻 15.3%，排水面积增加 16.5%，节省石料数百吨，安全度提高 11.4%。近年通过对赵州桥的钻探勘测和力学计算，发现赵州桥在很多方面均符合现代拱桥设计和施工的原则，令人叹为观止！这种敞肩圆弧拱桥结构是中国首创的优秀桥型，它比世界上相同类型的石拱桥要早 1200 多年。

对木结构而言，我国独创的斗拱结构堪称中国的一绝。斗拱可以减少梁的计算跨度，从而减少梁所受的弯矩和剪力，尤其是具有良好的抗振性能。山西应县佛宫寺释迦塔，共五层高达 66m，底径 30m。它建于公元 1056 年（辽清宁二年），通常又称应州木塔。900 多年来，应州木塔经受了烈日严寒、狂风暴雨甚至是烈度八级地震的考验，至今仍巍然屹立。它是我国现存最早、最高的木塔，也是世界上现存最高大的古代木结构建筑。早在 1103 年，《营造法式·大木作制度》中就提出：“凡梁之大小，各随其广分为三分，以二分为厚”。这就是说，从圆木中截取矩形梁时，矩形木梁截面的高宽比应为 3 : 2。直到 18 世纪初，法国学者帕伦 (A. Parent) 才指出高宽比为 $\sqrt{2} : 1$ 时强度最大；到 19 世纪初，英国科学家杨又指出，高宽比为 $\sqrt{3} : 1$ 时刚度最大。由此可见，《营造法式》对高宽比的规定介乎 $\sqrt{2} : 1$ 与 $\sqrt{3} : 1$ 之间，具有较大的强度和刚度，十分合理。

对金属结构而言，我们的祖先在汉朝（公元一世纪）就开始利用铁轴。三国时（公元 253 年）马均开始运用了齿轮。红军长征时强渡的泸定铁索桥，建于 1696 年（清康熙四十五年），是世界上第一座长达 100m 的铁索桥。在它身上，体现了

近代大跨度悬索桥的设计思想，其水平居于当时欧洲的科学技术之上。

然而，由于旧中国封建制度长期的桎梏，严重地阻碍了生产力的发展，人民的智慧和创造力未能得到很好的发挥，材料力学方面的知识也就一直停留在经验阶段而没有多大的提高。与此相反，14世纪以后，欧洲方面却由于社会经济基础的变革所带来的生产发展，推动了材料力学知识的发展，并取得了很大的进步。

材料力学作为一门正式的学科，一般认为是以意大利科学家伽利略(G. Galileo, 1564—1642)在1638年问世的名著《关于两门新科学的对话和数学证明》作为开始的标志。当时，为了满足海内外贸易的要求，需要增大船舶的吨位、修建水闸等等。伽利略为了建造船只和水闸所需梁的尺寸问题进行了一些实验，并于1638年首先提出了计算梁强度的公式。尽管他由于使用了刚体力学的方法而未考虑梁的变形致使其结论并不正确，但他开辟了用实验和按理论方法计算的新途径。从此，关于结构和构件的设计工作就不再是单凭经验，而是在科学理论的指导下进行了。后来，英国科学家胡克(R. Hooke, 1635—1703)通过对一系列的实验资料的总结，于1678年提出了描述材料力学中力与变形之间的关系，这就是著名的胡克定律。接着，瑞士科学家雅各布·伯努利(J. Bernoulli, 1654—1705)、马略特(E. Mariotte)等人得出了有关梁、柱性能的基础知识，并且研究了材料的强度性能与其他力学性能。

18、19世纪，是材料力学界群星灿烂的时代。在众多的学者中，对材料力学贡献最大的当首推法国著名科学家库仑(C. A. Coulomb, 1736—1806)。他通过实验验证，修正了伽利略和马略特理论中的错误，并且于1784年建立了圆杆情况下扭矩与扭转角之间的关系，获得了梁的弯曲正应力和圆杆扭转切应力的正确结果。库仑还在液体的粘滞度、摩擦力、梁的弯曲、挡土墙、拱和扭转振动以及其他方面作出了贡献。俄国科学家罗蒙诺索夫(M. X. Ломоносов, 1711—1765)开始用实验的方法研究材料的力学性质。俄国彼得堡科学院院士欧拉(L. Euler, 1707—1783)不但是位卓越的数学家，同时在力学上也作出了出色的贡献。欧拉研究了受压杆的稳定理论，并早在1744年就第一个导出理想细长压杆的临界载荷。但这个成果当时并未引起人们足够的重视，直到一百多年后由于钢桥的兴起，发生了大量因压杆失稳而导致的惨痛事故，人们才意识到欧拉关于受压杆稳定理论的意义，并用实验验证了该理论的正确性。直到现在，欧拉关于受压杆的稳定理论仍是对受压杆进行稳定计算时的重要理论基础。雅各布·伯努利的弟弟约翰·伯努利(J. Bernoulli, 1667—1748)第一个提出了虚位移原理。意大利数学家拉格朗日(J. L. Lagrange, 1736—1813)第一个阐述了虚功原理。法国科学家泊松(S. D. Poisson, 1781—1840)计算了受拉杆的横向线应变，并发现在弹性范围内材料的横向线应变与纵向线应变之比是一个常数。这一比值也因此被称为泊松比。

1826年第一本《材料力学》书出版，作者是法国著名科学家纳维（C.-L.-M.-H. Navier, 1785—1836）。

19世纪中叶，铁路桥梁工程的发展，大大推动了材料力学的发展，使材料力学变成以钢材为主要研究对象。按照钢材的特点，使均匀连续、各向同性这些基本假定以及胡克定律成为当今材料力学的基础。

20世纪，由于现代工业的崛起，要求更经济地使用材料，促使材料力学的研究范围逐渐扩大到弹性范围以外，产生了进行塑性变形和作用力间的关系及内部应力分布规律研究的另一门科学——塑性力学。

由于高强度钢材的应用，出现了不少由于构件中存在初始裂纹而发生低应力脆断的事故。第二次世界大战期间，美国5000艘货轮共发生1000多次破坏事故。1954年英国两架喷气式飞机“彗星”号先后在地中海上空失事，很多国家发生高压锅炉、压力容器的爆炸或损坏事故……。直到20世纪50年代，美国的北极星导弹固体燃料发动机壳体的爆炸事故，促使人们对带裂纹的材料和结构进行强度及裂纹扩展规律方面的研究。这样，又导致了另一门科学——断裂力学的建立。

近50年来科学技术有了突飞猛进的发展，由于工业技术的高速发展，特别是航空与航天工业的崛起，各种新型材料（例如复合材料、高分子材料、纳米材料）的不断问世并应用于工程实际，导致新的学科如复合材料力学等应运而生。由于实验设备日趋完善，实验技术水平不断提高，现在的实验手段已有声发射技术、电测、光弹性测量、全息光弹性测量、全息干涉测量、激光散斑法、白光散斑法、电子散斑法和云纹法等。由于计算机的出现，新的计算方法层出不穷，如差分法、传递矩阵法、加权残数法、有限元法和边界元法等。所有这些进展使得材料力学所涉及的领域更加宽阔，知识更加丰富。这表明材料力学仍然处于新的发展之中，上一个世纪形成的材料力学也面临着逐步更新的趋势。材料力学是一门成熟而又年轻、融合着力和建筑美的科学。

第三节 可变形固体的性质及基本假设

在理论力学中，曾把固体看作是绝对刚体。实际上，绝对刚体是不存在的。任何固体在外力的作用下都会发生变形。由于材料力学研究的是构件在外力的作用下强度、刚度和稳定性的问题，固体的变形就成为它的主要性质之一。因此，在材料力学中必须将构成构件的各种固体视为**可变形固体**。

固体受力后将产生变形，如载荷不超过某一限度，则卸除载荷后变形可自行消失。固体材料在卸除载荷后恢复其原来的形状和尺寸大小的这种性质称为**弹性**。卸除载荷后能消失的变形称为**弹性变形**。在弹性变形过程中，若力与变形服从线

性规律，称为**线弹性变形**；不服从线性规律的变形则称为**非线性弹性变形**。如果载荷超过了一定的限度，则材料在卸除载荷后只有部分变形可自行消失，部分变形不能消失而残留下来。材料的这种性质称为**塑性**，部分不能消失而残留下来的变形则称为**塑性变形**。

固体材料通常分为晶体和非晶体，其内部微观结构由于材料的不同而不同。在研究固体变形时，如果考虑这些微观结构上的差异，不仅在理论分析中会遇到极其复杂的数学问题和物理问题；而且在将理论应用于工程实际时也会带来极大的不便。因此，在材料力学中对变形固体作了以下几点假设：

1. 连续性假设

认为固体材料是连续的，即认为材料无空隙地分布于物体所占的整个空间中。从微观结构看，材料的粒子当然不是处处连续分布的。但从统计学的角度看，只要所考察的物体的几何尺寸足够大，而且所考察的物体上的每一“点”都是宏观上的点，则可以认为物体全部体积内的材料是连续的。根据这一假设，物体内的应力、变形等物理量可以表示为各点坐标的连续函数，从而有利于建立相应的数学模型。

2. 均匀各向同性假设

认为物体中的材料均匀分布并且各向同性，即认为物体中各点材料在各个方向上的力学性能是相同的。根据这一假定，可以用一个参数描写各点在各个方向上的某种力学性能。

3. 小变形假设

认为物体在外力作用下所产生的变形与物体本身的几何尺寸相比是很小的。根据这一假设，当考察变形固体的平衡问题时，一般可以略去变形的影响，因而可以直接应用刚体静力学的分析方法。

第四节 材料力学的主要研究对象及杆件变形的基本形式

实际构件有各种不同的形状。材料力学主要研究长度远大于横截面尺寸的构件，称为**杆件**，或简称为**杆**。杆件的主要几何特征有两个，即横截面和轴线。按杆轴线的曲直，可分为直杆和曲杆；根据横截面形状及大小是否沿杆长变化，又可分为等截面杆和变截面杆。轴线为直线且沿轴线截面不发生变化的杆件，称为**等直杆**。这是最为常见的一类杆，是材料力学研究的最主要对象（图 1-1）。除杆件以外，材料力学还研究简单的壳体，如薄壁圆筒等。

在实际工程中，杆件受到各种各样的外力作用，故杆件的变形也就有不同的形式。但归结起来不外乎是以下四种基本形式的一种，或是其中几种基本形式的

docsriver 文川网
入驻商家 古籍书城

在文川网搜索古籍书城 获取更多电子书

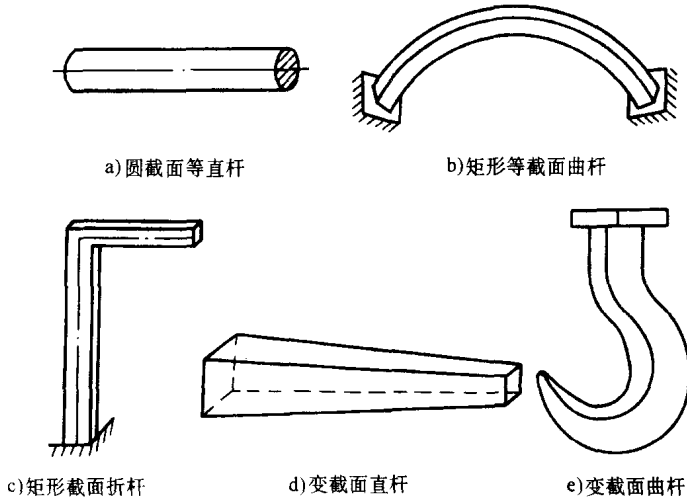


图 1-1 杆的各种形式

组合。

1. 拉伸或压缩

图 1-2a 表示一简易吊车。在载荷 F_P 作用下，AC 杆受拉（图 1-2b）而 BC 杆受到压缩（图 1-2c）。这类变形的受力特点是杆件受到一对大小相等、方向相反、作用线与杆件轴线重合的力的作用，其变形特点表现为杆件的长度方向发生伸长或缩短。起吊重物的钢索、桁架的杆件、液压缸的活塞杆等的变形，都属于拉伸或压缩变形。

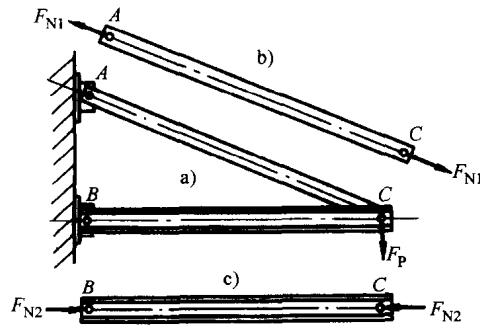


图 1-2 轴向拉伸（压缩）

2. 剪切

图 1-3a 表示一铆钉联接，在 F_P 力的作用下，铆钉受到剪切。这类变形的受力特点是杆件受到一对大小相等、方向相反、作用线相互平行且相距很近的横向力的作用，其变形特点表现为受剪杆件的两部分沿外力作用方向发生相对错动（图 1-3b）。工程中常用的联接件，如螺栓、销钉、键等都产生剪切变形。

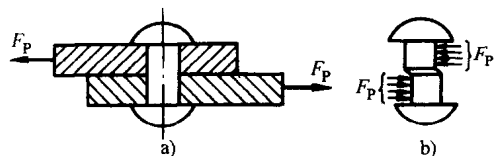


图 1-3 剪切

3. 扭转

图 1-4a 所示的汽车转向轴 AB，在工作时发生扭转变形。这类变形的

受力特点是杆件受到一对大小相等、方向相反、作用面都垂直于杆轴的力偶作用(图 1-4b),其变形特点表现为杆件的任意两个横截面发生绕轴线的相对转动。汽车的传动轴、车床的主轴等都是受扭杆件。

4. 弯曲

图 1-5a 所示的火车轮轴的变形,即为弯曲变形。这类变形的受力特点是杆件受到垂直于杆轴线的横向力的作用(或受到一对大小相等、方向相反、作用在杆的纵向对称面内的力偶作用),其变形特点表现为杆件的轴线由直线变为曲线(图 1-5b)。在工程中,弯曲变形是最为常见的一种变形形式。各种桥梁、房屋中的横梁、桥式起重机的大梁的变形,都属于弯曲变形。

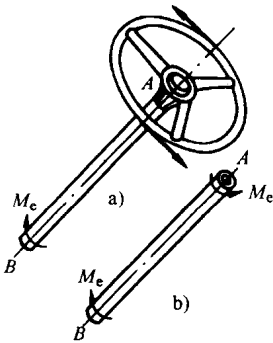


图 1-4 扭转

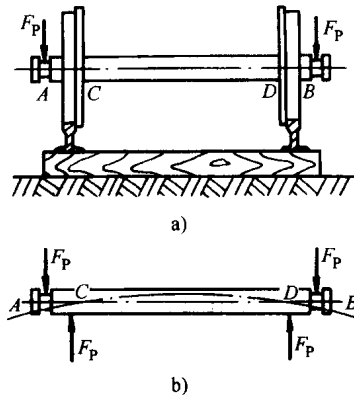


图 1-5 弯曲

还有一些杆件同时发生几种基本变形,如曲梁在受载时发生弯曲和扭转两种基本变形;车床主轴工作时同时发生弯曲、扭转和压缩三种基本变形等等,这种情况称为组合变形。在以后的各章中,将依次讨论四种基本变形的强度及刚度计算,然后再讨论组合变形。

第二章 拉伸、压缩与剪切

第一节 概 述

杆件受到一对等值、反向、作用线与轴线重合的外力作用，发生轴线方向的伸长或缩短，这种变形叫**轴向拉伸或压缩**，是受力杆件最简单而又最基本的变形。其受力简图如图 2-1 所示，图中用双点划线表示变形后的形状。轴向拉伸或压缩杆

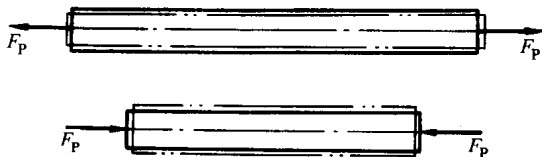


图 2-1 杆件的轴向拉伸或压缩

件的受力特点是作用于杆件上的外力合力的作用线与杆件轴线重合，变形特点是发生沿轴线方向的伸长或缩短。

生产实践中承受轴向拉伸或压缩的杆件有很多。如液压机传动机构中的活塞杆在油压和工作阻力作用下、起重钢索在起吊重物时，都承受

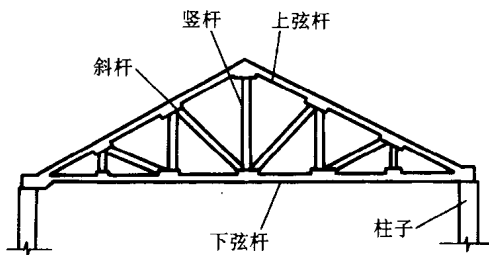


图 2-2 三角形屋架

拉伸；千斤顶的螺杆在顶起重物时，则承受压缩。至于桁架中的杆件，则不是受拉便是受压，如图 2-2 所示的三角形屋架中，下弦杆和竖杆属于拉杆，上弦杆和斜杆及支承屋架的柱子都是压杆。

第二节 轴向拉伸或压缩时的内力

一、内力

物体不受外力作用时，其内部各质点之间就存在着相互作用的力，以保持物体各部分间的相互联系和原有形状。若物体受到外力作用而发生变形，其内部各部分之间因相对位置改变而引起的相互作用力的改变量，即因外力引起的附加相互作用力，叫**附加内力**，简称**内力**。由于物体是均匀连续的，因此在物体内部相

邻部分之间相互作用的内力，实际上是一个连续分布的内力系，而内力就是这分布内力系的合成（力或力偶）。这种内力随外力增大而增大，到达某一限度时就会引起构件破坏。所以，内力与构件的强度密切相关。

二、截面法 轴力

内力的计算是分析构件的强度、刚度和稳定性等问题的基础。下面讨论拉（压）杆的内力计算，并介绍求内力的一般方法。

由于内力是受力物体内部相邻部分之间的相互作用力，为了显示内力，可应用截面法。设一等直杆在两端轴向拉力 F_P 的作用下处于平衡，欲求杆件任一横截面 $m-m$ 上的内力（图 2-3a）。为此沿横截面 $m-m$ 假想地把杆件截分成两部分，任取一部分（如左半部分），弃去另一部分（如右半部分），并将弃去部分对留下部分的作用以截面上的分布内力系来代替，用 F_N 表示这一分布内力系的合力，且内力 F_N 成了左半部分的外力（图 2-3b）。

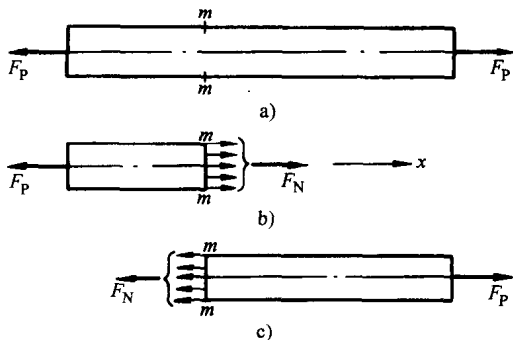


图 2-3 截面法求轴力

由于整个杆件处于平衡状态，故左半部分也应平衡，由其平衡方程 $\sum F_x = 0$ ，得

$$F_N - F_P = 0$$

$$F_N = F_P$$

F_N 就是杆件任一截面 $m-m$ 上的内力。因为外力 F_P 的作用线与杆件轴线重合，内力系的合力 F_N 的作用线也必然与杆件的轴线重合，所以 F_N 称为轴力。

若取右半部分作研究对象，则由作用与反作用原理可知，右半部分在 $m-m$ 截面上的轴力与前述左半部分 $m-m$ 截面上的轴力数值相等而指向相反（图 2-3c），且由右半部分的平衡方程也可得到 $F_N = F_P$ 。

为了使由左半部分和右半部分求得的同一截面上的轴力不仅数值相等，且具有相同的正、负号，习惯上把拉伸时的轴力规定为正，压缩时的轴力规定为负。

对于压杆，也可通过上述过程求得任一截面上的轴力。

上述用截面假想地把杆件分成两部分，以显示并确定内力的方法叫截面法。它是求内力的一般方法，也是材料力学中的基本方法之一。从上述轴力分析得知，截面法可归纳为以下三个步骤：

1) 欲求某一截面上的内力，就沿该截面假想地把杆件分成两部分，任意地留下一部分作为研究对象，并弃去另一部分。

2) 用作用于截面上的内力代替弃去部分对留下部分的作用。

3) 建立留下部分的平衡方程, 确定未知的内力。

三、轴力图

若沿杆件轴线作用的外力多于两个, 则在杆件各部分的横截面上, 轴力不尽相同。这时往往用轴力图表示轴力沿杆件轴线方向变化的情况。关于轴力图的绘制, 下面用例题来说明。

【例题 2-1】 一等直杆受力情况如图 2-4a 所示。试作杆的轴力图。

解 (1) 求约束力

直杆受力如图 2-4b 所示, 由杆的平衡方程 $\sum F_x = 0$ 得

$$F_{RA} = 10\text{kN}$$

(2) 用截面法计算各段的轴力

AB 段: 沿任意截面 1—1 将杆截开, 取左段为研究对象, 设 1—1 截面上的轴力为 F_{N1} , 且 F_{N1} 为正 (拉力, 图 2-4c), 由左段的平衡方程 $\sum F_x = 0$ 有

$$F_{N1} - F_{RA} = 0$$

$$F_{N1} = F_{RA} = 10\text{kN}$$

BC 段: 沿任意截面 2—2 将杆截开, 取左段为研究对象, 设 2—2 截面上的轴力为 F_{N2} , 且 F_{N2} 为正 (拉力, 图 2-4d), 由左段的平衡方程 $\sum F_x = 0$ 有

$$F_{N2} - F_{RA} - 40\text{kN} = 0$$

$$F_{N2} = 50\text{kN}$$

CD 段: 沿任意截面 3—3 将杆截开, 取右段为研究对象, 设 3—3 截面上的轴力为 F_{N3} , 且 F_{N3} 为正 (拉力, 图 2-4e), 由右段的平衡方程 $\sum F_x = 0$ 有

$$-F_{N3} - 25\text{kN} + 20\text{kN} = 0$$

$$F_{N3} = -5\text{kN}$$

结果为负, 说明 F_{N3} 的指向与实际相反, 实为压力。

DE 段: 同理可得任意截面 4—4 上的轴力为

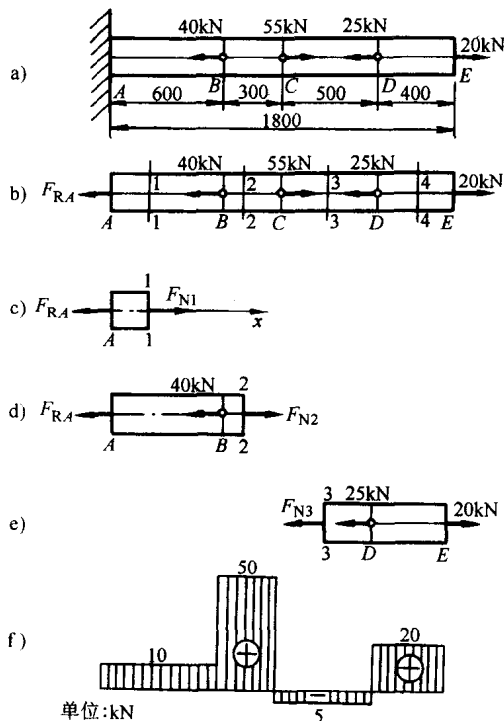


图 2-4 例题 2-1 图

$$F_{N4} = 20\text{kN}$$

(3) 绘制轴力图

用平行于杆轴线的坐标表示横截面的位置；用垂直于杆轴线的坐标表示横截面上的轴力 F_N ，按适当比例将正值轴力绘于横轴上侧，负值轴力绘于横轴下侧，作出杆的轴力图如图 2-4f 所示。从图中容易看出， AB 、 BC 和 DE 段受拉， CD 段受压，且 $F_{N\max}$ 发生在 BC 段内任意横截面上，其值为 50kN 。

该题中，由于杆件的 E 端为自由端，故 A 处的约束力可不求，沿任一截面截开后，每次都选取右段计算轴力即可。

第三节 轴向拉伸或压缩时的应力

只根据轴力并不能判断杆件是否有足够的强度。例如用同一材料制成粗细不同的两杆件，在相同的拉力下，两杆的轴力自然是相同的。但当拉力逐渐增大时，细杆必定先拉断，这说明拉杆的强度不仅与轴力的大小有关，而且与横截面积有关。所以必须用横截面上的应力来度量杆件的受力程度。本节先讨论应力的概念，然后讨论拉（压）杆横截面及斜截面上的应力。

一、应力的概念

应力是受力杆件某一截面上一点处的内力集度。若考察受力杆截面 $m-m$ 上点 C 处的应力（图 2-5a），则围绕 C 点取一微面积 ΔA ，设 ΔA 面积上分布内力的合力为 ΔF ，于是，在面积 ΔA 上内力的平均集度为

$$p_m = \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

式中 p_m 称为面积 ΔA 上的平均应力。一般地说，截面 $m-m$ 上内力分布并不是均匀的，因而，平均应力 p_m 的大小和方向将随 C 点的位置及所取的微面积 ΔA 的大小而变化，随着 ΔA 的逐渐缩小， p_m 的大小和方向都将逐渐变化。当 ΔA 趋于零时， p_m 的大小和方向都将趋于一定极限，即

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} p_m = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

p 称为 C 点的应力，它是分布内力系在 C 点的集度，反映内力系在 C 点的强弱程度。 p 是一个矢量，一般说既不与截面垂直，也不与截面相切。通常把应力 p 分解成垂直于截面的分量 σ 和与截面相切的分量 τ （图 2-5b）， σ 称为正应力， τ 称为切应力。

在国际制单位中，应力的单位是牛/米²（ N/m^2 ），称为帕斯卡或简称为帕（Pa）。由于这个单位太小，使用不便，通常使用兆帕（MPa），有时还用吉帕（GPa），且

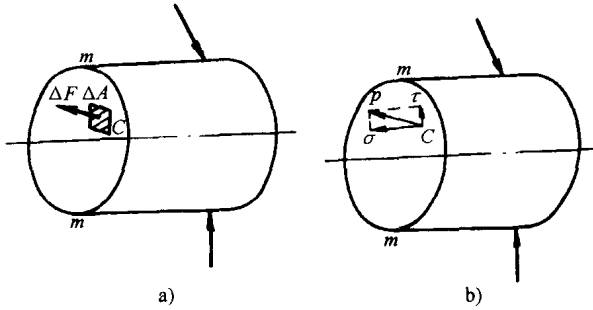


图 2-5 截面上某一点处的应力

$$1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$$

$$1\text{GPa} = 10^3\text{MPa} = 10^9\text{Pa}$$

应注意，应力是在受力物体的某一截面上某一点处定义的，因此，讨论应力必须明确是在哪一个截面上的哪一点处，且应力是矢量。通常规定离开截面的正应力为正，指向截面的正应力为负，即拉应力为正，压应力为负；而对截面内部（靠近截面）的一点产生顺时针方向力矩的切应力为正，反之为负。

二、拉（压）杆横截面上的应力

在拉（压）杆的横截面上，与轴力 F_N 对应的应力只有正应力 σ 。根据连续性假设，横截面上到处都存在着内力。若以 A 表示横截面面积，则微面积 dA 上的微内力 σdA 组成一个垂直于横截面的平行力系，其合力就是轴力 F_N 。于是得静力关系

$$F_N = \int_A \sigma dA \quad (a)$$

只有知道 σ 在横截面上的分布规律后，才能完成式 (a) 中的积分。

首先从观察杆件的变形入手。图 2-6 所示为一等截面直杆。变形前，在其侧面上画上垂直于轴线的直线 ab 和 cd 。拉伸变形后，发现 ab 和 cd 仍为直线，且仍垂直于轴线，只是分别平移至 $a'b'$ 和 $c'd'$ 。根据这一现象，对杆内变形作如下假设：变形前原为平面的横截面，变形后仍保持为平面且仍垂直于轴线，只是各横截面间沿杆轴相对平移。这就是平面假设。

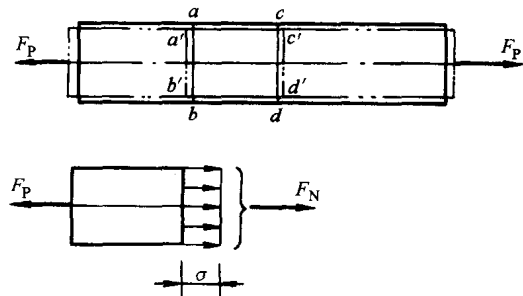


图 2-6 横截面上的应力

如果设想杆件是由无数纵向“纤维”所组成，则由平面假设可知，任意两横截面间的所有纤维的变形相同。因材料是均匀的（基本假设之一），所有纵向纤维

的力学性能相同。由它们的变形相等和力学性能相同，可以推想各纵向纤维的受力是一样的。所以，横截面上各点的正应力 σ 相等，即正应力均匀分布于横截面上， σ 等于常量。于是由式 (a) 得

$$F_N = \sigma \int_A dA = \sigma A$$

$$\sigma = \frac{F_N}{A} \quad (2-1)$$

式 (2-1) 为拉 (压) 杆横截面的正应力计算公式。但应注意，对于细长杆受压时容易被压弯，属于稳定性问题，将在第十章讨论。这里所指的是受压杆未被压弯的情况。正应力的正负号与轴力的正负号相同，拉为正，压为负。

导出式 (2-1) 时，要求外力合力与杆件轴线重合，这样才能保证各纵向纤维变形相等，横截面上正应力均匀分布。若轴力沿轴线变化，可作出轴力图，再由式 (2-1) 求出不同横截面上的应力。当截面的尺寸也沿轴线变化时 (图 2-7)，只要变化缓慢，外力合力与轴线重合，式 (2-1) 仍可使用。这时把它写成

$$\sigma(x) = \frac{F_N(x)}{A(x)} \quad (2-2)$$

式中， $\sigma(x)$ 、 $F_N(x)$ 和 $A(x)$ 表示这些量都是横截面位置 (坐标 x) 的函数。

三、拉 (压) 杆斜截面上的应力

前面讨论了直杆轴向拉伸或压缩时横截面上的正应力。下面讨论任意斜截面上的应力。设直杆的轴向拉力为 F_P (图 2-8a)，横截面面积为 A ，由式 (2-1)，横截面上的正应力 σ 为

$$\sigma = \frac{F_N}{A} = \frac{F_P}{A} \quad (b)$$

设斜截面 $k-k$ 与横截面成 α 角 (亦即 x 轴与斜截面的法线之间的夹角)，其面积为 A_α ， A_α 与 A 之间的关系为

$$A_\alpha = \frac{A}{\cos\alpha} \quad (c)$$

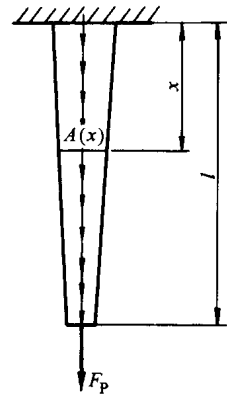


图 2-7 轴力与截面面积沿轴线连续变化

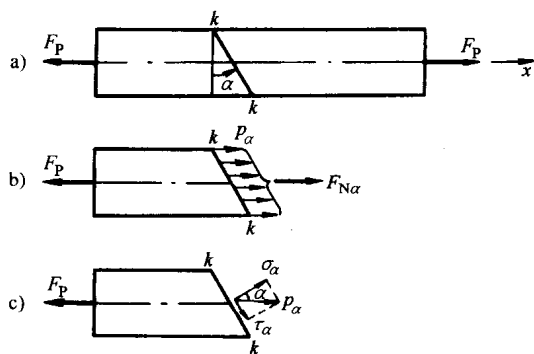


图 2-8 斜截面上的应力

若沿斜截面 $k-k$ 假想地把杆件分成两部分, 以 $F_{N\alpha}$ 表示斜截面 $k-k$ 上的内力, 由左段的平衡 (图 2-8b) 可知

$$F_{N\alpha} = F_P$$

仿照证明横截面上正应力均匀分布的方法, 可知斜截面上的应力也是均匀分布的, 若以 p_α 表示斜截面 $k-k$ 上的应力, 于是有

$$p_\alpha = \frac{F_{N\alpha}}{A_\alpha} = \frac{F_P}{A_\alpha}$$

将式 (c) 代入, 并注意式 (b) 的关系, 得

$$p_\alpha = \frac{F_P}{A} \cos\alpha = \sigma \cos\alpha \quad (d)$$

把应力 p_α 分解成垂直于斜截面的正应力 σ_α 和相切于斜截面的切应力 τ_α (图 2-8c), 且

$$\sigma_\alpha = p_\alpha \cos\alpha = \sigma \cos^2\alpha \quad (2-3)$$

$$\tau_\alpha = p_\alpha \sin\alpha = \sigma \cos\alpha \sin\alpha = \frac{\sigma}{2} \sin 2\alpha \quad (2-4)$$

式 (2-3)、式 (2-4) 为通过拉 (压) 杆内任一点处不同方位斜截面上的应力计算公式。拉 (压) 杆斜截面上既有正应力又有切应力, 且 σ_α 、 τ_α 都是 α 的函数, 即不同方位的斜截面上应力不同。

当 $\alpha=0^\circ$ 时, 斜截面 $k-k$ 实为横截面, σ_α 达最大值, 且 $\sigma_{\max} = \sigma$, $\tau_\alpha = 0$; 当 $\alpha=45^\circ$ 时, τ_α 达最大值, 且 $\sigma_\alpha = \tau_{\max} = \frac{\sigma}{2}$; 当 $\alpha=90^\circ$ 时, $\sigma_\alpha = \tau_\alpha = 0$, 表示在平行于杆轴线的纵向截面上无任何应力。

σ_α 、 τ_α 的正负规定与前面相同, 对 α 的正负作如下规定: 以 x 轴为起点, α 逆时针转向者为正, 反之为负。

【例题 2-2】 图 2-9a 所示轴向受压等截面杆件, 横截面面积 $A=400\text{mm}^2$, 载荷 $F_P=50\text{kN}$, 试求横截面及 $\alpha=40^\circ$ 斜截面上的应力。

解: 杆件任一截面上的轴力 $F_N = -50\text{kN}$, 所以杆件横截面上的正应力为

$$\sigma = \frac{F_N}{A} = \frac{-50 \times 10^3 \text{N}}{400 \times 10^{-6} \text{m}^2} = -1.25 \times 10^8 \text{Pa} = -125 \text{MPa}$$

由式 (2-3)、式 (2-4) 得 $\alpha=40^\circ$ 斜截面上的正应力和切应力分别为

$$\sigma_{40^\circ} = \sigma \cos^2\alpha = -125 \times \cos^2 40^\circ \text{MPa} = -73.4 \text{MPa}$$

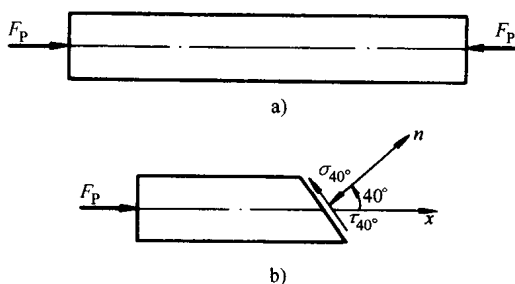


图 2-9 例题 2-2 图

$$\tau_{40^\circ} = \frac{\sigma}{2} \sin 2\alpha = \frac{-125}{2} \times \sin 80^\circ \text{MPa} = -61.6 \text{MPa}$$

应力的方向如图 2-9b 所示。

第四节 材料在拉伸和压缩时的力学性能

构件内的应力随外力增大而增大,但在一定应力作用下构件是否破坏,则与材料的力学性能有关。此外,分析构件的变形同样也需要了解材料的力学性能。

材料的力学性能是指材料从受力开始直到破坏这一过程中,所表现出的在变形和破坏等方面的一些特性。它要由试验来测定。材料的力学性能并不是固定不变的,会随外界因素如温度、载荷形式(静载、动载)而改变,本节主要讨论在常温静载荷条件下(常温静载试验),材料在拉伸和压缩时的力学性能。

为了得出可靠的和可以比较的试验结果,试件的尺寸必须统一规定。在作拉伸试验时,对于一般金属材料,标准试件做成两端较粗而中间有一段等直的部分,在此等直部分中规定一段作为测量变形的标准,其长度 l 称为标距(图 2-10a)。当试件受力时,标距内任一横截面上的应力都相同。常用试件的标距 l 与横截面面积之间的比例为:

圆形截面试件: $l=10d$ 或 $l=5d$;

矩形截面试件: $l=11.3\sqrt{A}$ 或 $l=5.63\sqrt{A}$ 。

压缩试验通常采用圆截面和方截面的短试件(图 2-10b),为了避免试件在试验过程中因失稳而变弯,其长度 l 与横截面直径 d 或边长 b 的比值一般规定为 $1\sim 3$ 。

进行拉伸和压缩试验时,要用到两类主要设备:

1) 对试件施加载荷使它发生变形,并能测出拉(压)力(整个截面的内力)的设备。如拉力机、压力机和万能试验机。

2) 量测试件变形的仪器,如电阻应变仪、杠杆式引伸仪、千分表等。

关于试验设备的具体构造原理和使用方法,可参阅有关的力学试验教材,并在试验中通过操作熟悉了解。

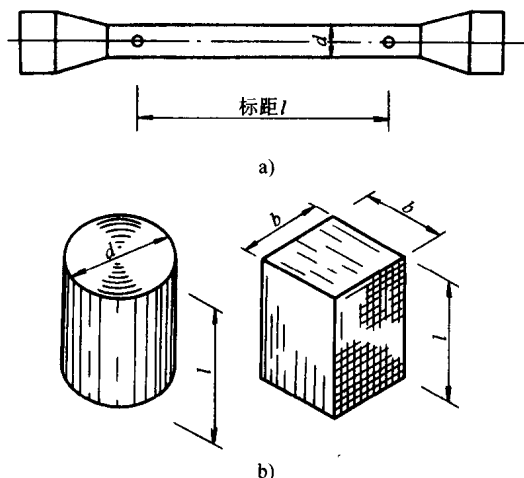


图 2-10 拉伸与压缩试验的试件

将试样装在试验机上,受到缓慢增加的拉(压)力作用,对应着每一个力 F_P , 试样就有一个变形量。表示 F_P 和 Δl 关系的图,称为拉伸(压缩)图或 F_P - Δl 曲线,如图 2-11 所示。 F_P - Δl 曲线与试样的尺寸有关。为了消除试样尺寸的影响,把拉(压)力 F_P 除以试样横截面的原始面积 A , 得出正应力: $\sigma = F_P/A$; 同时把变形量 Δl 除以标距的原始长度 l , 得到应变(单位长度上的变形量): $\epsilon = \Delta l/l$ 。以 σ 为纵坐标, ϵ 为横坐标, 得到应力—应变图, 即 σ - ϵ 曲线。

一、塑性材料拉伸和压缩时的力学性能

(一) 低碳钢拉伸时的力学性能

低碳钢是指碳含量在 0.3% (质量分数) 以下的碳素钢, 这类钢材在工程实际中使用较广, 在拉伸试验中表现出的力学性能也最为典型, 其 σ - ϵ 曲线如图 2-12 所示。从图中可以看出低碳钢的力学性能大致如下:

1. 弹性阶段

在拉伸的初始阶段, 变形完全是弹性的。其中 Oa 段为直线, 说明在这一阶段内, 应力 σ 与应变 ϵ 成正比, 即: $\sigma \propto \epsilon$ 或者写成等式

$$\sigma = E\epsilon \quad (2-5)$$

这就是拉伸或压缩的胡克定律。式中 E 为与材料有关的比例常数, 称为弹性模量。因为应变 ϵ 没有量纲, 故 E 的量纲与 σ 相同, 常用单位是吉帕。式 (2-5) 表明, $E = \sigma/\epsilon = \tan\alpha$, α 是直线 Oa 的倾角。直线部分的最高点 a 所对应的应力 σ_p 称为比例极限。当 $\sigma \leq \sigma_p$ 时, 应力与应变成正比, 材料才服从胡克定律, 这时称材料是线弹性的。

应力超过比例极限后, 即从 a 点到 b 点, σ 与 ϵ 之间的关系不再是直线, 但变形仍是弹性的。 b 点所对应的应力 σ_e 是材料只出现弹性变形的最高应力值, 称为弹性极限。在 σ - ϵ 曲线上, a 、 b 两点非常接近, 所以工程上对弹性极限和比例极限并不严格区分。

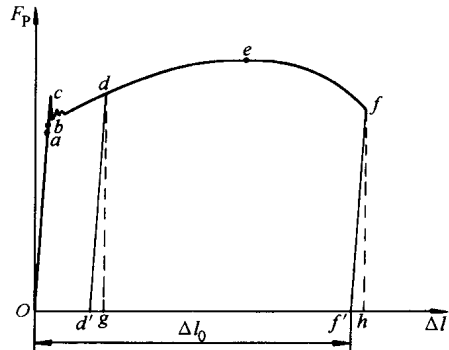


图 2-11 F_P - Δl 图

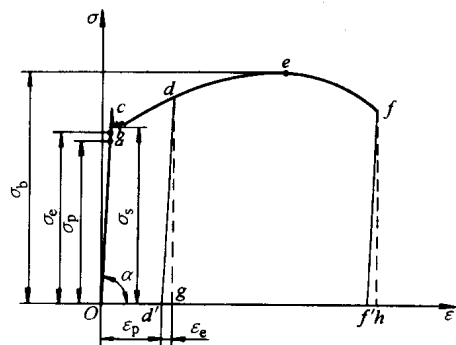


图 2-12 低碳钢的应力-应变曲线

2. 屈服阶段

当应力超过 b 点增加到某一数值时, 应变有非常明显的增加, 而应力先是下降, 然后作微小的波动, 在 $\sigma-\epsilon$ 曲线上出现接近水平线的小锯齿形线段。这种应力基本保持不变, 而应变显著增加的现象, 称为**屈服**或**流动**。在屈服阶段内的最高应力和最低应力分别称为上屈服点和下屈服点。上屈服点的数值与试样形状、加载速度等因素有关, 一般是不稳定的; 下屈服点则有比较稳定的数值, 能够反应材料的性能。通常就把下屈服点称为**屈服点**, 用 σ_s 来表示。

表面磨光的试样屈服时, 表面将出现与轴线大致成 45° 倾角的条纹(图 2-13)。这是由于材料内部相对滑移形成的, 称为**滑移线**。因为拉伸时在与杆轴成 45° 倾角的斜截面上, 切应力为最大值, 可见屈服现象的出现与最大切应力有关。



图 2-13 试样表面的滑移线

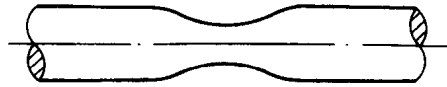


图 2-14 试样缩颈

材料屈服表现为显著的**塑性变形**(**残留变形**), 而零件的塑性变形将影响机器的正常工作, 所以屈服点 σ_s 是衡量材料强度的重要指标。

3. 强化阶段

经过屈服阶段后, 材料又恢复了抵抗变形的能力, 要使它继续变形必须增加拉力。这种现象称为材料的**强化**。在图 2-12 中, 强化阶段中的最高点 e 所对应的应力 σ_b 是材料所能承受的最大应力, 称为**抗拉强度**。它是衡量材料强度的另一重要指标。在强化阶段中, 试样的横向尺寸有明显的缩小。

4. 局部变形阶段

过 e 点后, 在试样的某一局部范围内, 横向尺寸突然急剧缩小, 形成缩颈现象(图 2-14)。由于在缩颈部分横截面面积迅速减小, 使试样继续伸长所需要的拉力也相应减少。在应力—应变图中, 用横截面原始面积 A 算出的应力 $\sigma = F_F/A$ 随之下降, 降落到 f 点, 试样被拉断。

5. 伸长率和截面收缩率

试样拉断后, 由于保留了塑性变形, 试样长度由原来的 l 变为 l_1 。用百分比表示的比值

$$\delta = \frac{l_1 - l}{l} \times 100\% \quad (2-6)$$

称为**伸长率**。伸长率是衡量材料塑性的指标。低碳钢的伸长率很高, 其平均值约为 $20\% \sim 30\%$, 这说明低碳钢塑性很好。

工程上通常按伸长率的大小把材料分成两大类, $\delta > 5\%$ 的材料称为**塑性材料**, 如碳钢、黄铜、铝合金等; 而把 $\delta \leq 5\%$ 的材料称为**脆性材料**, 如灰铸铁、玻璃、陶

docsriver 文川网
入驻商家 古籍书城

在文川网搜索古籍书城 获取更多电子书

瓷、混凝土等。

原始横截面面积为 A 的试样，拉断后缩颈处的最小截面面积变为 A_1 ，用百分比表示的比值

$$\psi = \frac{A - A_1}{A} \times 100\% \quad (2-7)$$

称为**截面收缩率**，是衡量材料塑性的另一个指标。

6. 卸载定律及冷作硬化

如把试样拉到超过屈服点的 d 点 (图 2-12)，然后逐渐卸除拉力，应力和应变关系将沿着斜直线 dd' 回到 d' 点。斜直线 dd' 近似地平行于 Oa 。这说明：在卸载过程中，应力和应变按直线规律变化，这就是**卸载定律**。拉力完全卸除后，应力—应变图中， $d'g$ 表示消失了的弹性应变 (ϵ_e)，而 Od' 表示不再消失的塑性应变 (ϵ_p)。

卸载后，如在短期内再次加载，则应力和应变大致上沿卸载时的斜直线 $d'd$ 变化，直到 d 点后，又沿曲线 def 变化。可见，在再次加载时，直到 d 点以前材料的变形是弹性的，过 d 点后才开始出现塑性变形。比较图 2-12 中的 $Oabcdef$ 和 $d'def$ 两条曲线，可见在第二次加载时，其比例极限

(亦即弹性阶段) 得到了提高，但塑性变形和伸长率却有所降低。这种现象称为**冷作硬化**。冷作硬化现象经退火后又可消除。

工程上经常利用冷作硬化来提高材料的弹性阶段。如起重用的钢索和建筑用的钢筋，常通过冷拔工艺来提高强度。又如对某些零件进行喷丸处理，使其表面发生塑性变形，形成冷硬层，以提高零件表面的强度。但另一方面，零件初加工后，由于冷作硬化使材料变脆变硬，给下一步加工造成困难，且容易产生裂纹，往往就需要在工序之间安排退火，以消除冷作硬化的影响。

(二) 其他塑性材料拉伸时的力学性能

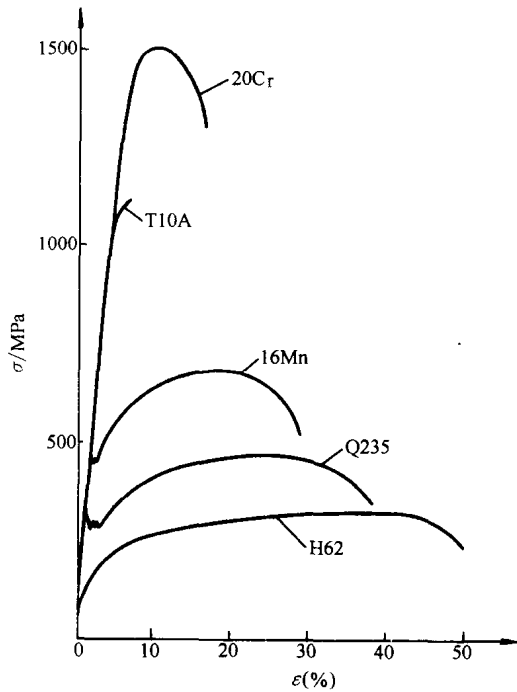


图 2-15 几种塑性材料的应力—应变曲线

工程上常用的塑性材料，除低碳钢外，还有中碳钢、某些高碳钢和合金钢、铝合金、青铜、黄铜等。图 2-15 中是几种塑性材料的 $\sigma-\epsilon$ 曲线[⊖]，其中有些材料，如 16Mn 钢，和低碳钢一样，有明显的弹性阶段、屈服阶段、强化阶段和缩颈阶段；有些材料，如黄铜 H62，没有屈服阶段，但其他三个阶段却很明显。还有一些材料，如高碳钢 T10A 没有屈服阶段和缩颈阶段，只有弹性阶段和强化阶段。

对没有明显屈服点的塑性材料，可以将产生 0.2% 塑性应变时的应力作为名义屈服点，并用 $\sigma_{0.2}$ 来表示（图 2-16）。

各类碳素钢中，随碳含量的增加，屈服点和抗拉强度相应提高，但伸长率降低。例如合金钢、工具钢等高强度钢材，屈服点较高，但塑性却较差。

（三）金属材料在压缩时的力学性能

这里仍首先介绍工程上常用的低碳钢在压缩时的力学性能，其 $\sigma-\epsilon$ 曲线如图 2-17 中的实线所示。为了便于比较材料在拉伸和压缩时的力学性能，在图 2-17 中以虚线绘出了低碳钢在拉伸时的 $\sigma-\epsilon$ 曲线。

比较图 2-17 中的低碳钢在拉伸和压缩时的两条 $\sigma-\epsilon$ 曲线可以看出：在屈服阶段以前，两曲线基本上是重合的，进入强化阶段后，试样在压缩时应力的增长率随着应变的增加而越来越大。之所以会出现这种现象，是因为到了强化阶段，试样在被压缩的同时，横截面面积逐渐增大，而在计算应力时仍采用试样的原来面积。此外，由于材料的延展性，试样的横截面面积越压越大，其单位面积上所受的力到后期就很难继续增长，这就使得低碳钢试样的抗压强度 σ_{bc} 无法测到。试样在压缩后变形成鼓状。

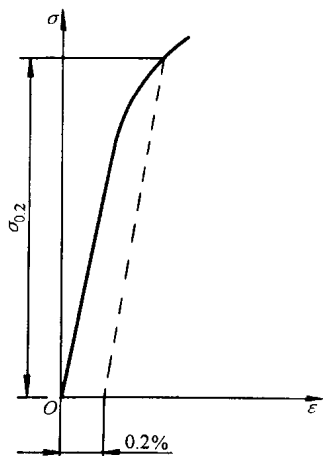


图 2-16 $\sigma_{0.2}$ 的定义

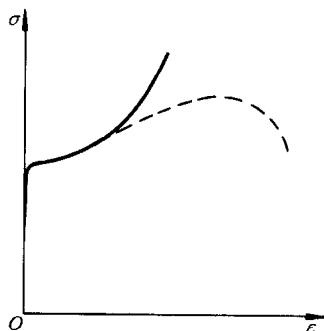


图 2-17 低碳钢压缩时的应力—应变曲线

⊖ 在图 2-15 中，合金钢 20Cr，930°C 水淬，180°C 回火。高碳钢 T10A，790°C 水淬，180°C 回火。螺纹钢 16Mn，普通黄铜 H62，软态。